Цена 7 коп.

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Препринт № 10 (1977)

Д.М.Карпинос

СПЕЧЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Киев – 1977

Доклад предусмотрен в программе Международного симпозиума по порошковой металлургии памяти П.Г.Соболевского,который проводится в Киеве 11-15 мая 1977 г.

Организатором симпозиума является Академия наук Украинской ССР при участии Научного Совета по порошковой металлургии ГКНТ СМ СССР, Академии наук СССР, Центрального правления НТО Машпром и Министерства черной металлургии СССР.

11. Тучинский Л.И. Уплотнение однонаправленных армированных порошковых материалов динамическим прессованием в жесткой обойме. "Порошковая металлургия", 1976, № 1.
12. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Спеченные армированные магнитно-твердые материалы. "Порошковая металлургия", 1976, № 6.

Спеченные композиционные материалы

Карпинос Дмитрий Моисеевич

© Институт проблем материаловедения АН УССР, 1977.

БФ 18612. 14.1У.77 г. Заказ 103. Объем 1 п.л.
Тираж 1000. Цена 7 коп.
ОНТИ ИПМ АН УССР, Киев-142, Кржижановского,3.

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

Препринт № 10 (1977)

Д.М.Карпинос

СПЕЧЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Киев - 1977

Доклад предусмотрен в программе Международного симпозиума по порошковой металлургии памяти П.Г.Соболевского,который проводится в Киеве 11-15 мая 1977 г.

Организатором симпозиума является Академия наук Украинской ССР при участии Научного Совета по порошковой металлургии ГКНТ СМ СССР, Академии наук СССР, Центрального правления НТО Машпром и Министерства черной металлургии СССР.

11. Тучинский Л.И. Уплотнение однонаправленных армированных порошковых материалов динамическим прессованием в жесткой обойме. "Порошковая металлургия", 1976, № 1.
12. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Спеченные армированные магнитно-твердые материалы. "Порошковая металлургия", 1976, № 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. Киев, "Наукова думка", 1972.
2. Композиционные материалы волокнистого строения. Монография. Под ред. И.Н.Францевича и Д.М.Карпиноса. Киев, изд-во "Наукова думка", 1970.
3. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. Монография. Киев, изд-во "Вища школа", 1977.
4. Карпинос Д.М., Максимович Г.Г., Кадыров В.Х., Лютый Е.М. Прочность композиционных материалов. Монография. Киев, изд-во "Наукова думка", 1977.
5. Тучинский Л.И. Особенности спекания пористых армированных материалов. "Порошковая металлургия", 1974, № 12.
6. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Сапожникова А.Б., Вишняков Л.Р. Спекание двухфазных композиций с недеформируемыми включениями. "Порошковая металлургия", 1976, № 7.
7. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Фефер В.Я. К вопросу об уплотнении армированных материалов типа "сэндвич" при горячем прессовании. "Порошковая металлургия", 1973, № 7.
8. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Фефер В.Я. Анализ энергетических затрат при динамическом горячем прессовании армированных материалов. "Порошковая металлургия", 1973, № 2.
9. Карпинос Д.М., Тучинский Л.И., Фефер В.Я., Вишняков Л.Р. Анализ энергетических затрат при свободной ковке металлических армированных композиций. "Порошковая металлургия", 1977, № 11.
10. Тучинский Л.И. Особенности уплотнения порошковых армированных материалов при горячем прессовании. "Порошковая металлургия", 1975, № 12.

Наиболее перспективными материалами с точки зрения получения максимальных значений удельных характеристик (прочность, жесткость и т.д.) в настоящее время являются композиционные материалы (КМ), основанные на использовании уникальных свойств волокон, нитевидных кристаллов и других волокнистых наполнителей /2-4/. Ни один выдающийся научно-технический проект (управляемые термоядерные реакции, МГД-преобразователи, ракетно-космические системы, проекты по использованию энергии лазерного излучения и т.д.) в настоящее время не может быть успешно решен без использования композиционных материалов. Принципы их создания предполагают получение материалов не только с уникальными свойствами, но и материалов с наперед заданными, регулируемыми во всех направлениях свойствами, что позволяет наиболее эффективно использовать материал.

КМ, сочетая высокую прочность с относительно низким удельным весом, находят применение в газотурбинных двигателях, корпусах глубоководных аппаратов, в виде пропитанных тканей для теплоизоляции, тросов, кабелей, листов, в конструкциях атомной энергетики.

Перспективно также создание конструкций для обычного машиностроения, где конструкции, основанные на классических гомогенных материалах, не в состоянии конкурировать с конструкциями из КМ.

В ближайшее время развитие исследований и внедрение в области композиционных материалов должны быть направлены на разработку и усовершенствование процессов изготовления материалов и конструкций на основе

алюминия, магния, меди, титана, никеля и сплавов этих металлов, способных работать при температурах, составляющих 0,8–0,9 $T_{пл}$ основы, и имеющих прочность в 2–4 раза выше прочности лучших современных материалов.

Большинство методов, применяемых при получении КМ, – это традиционные методы порошковой металлургии – прессование, спекание, горячее прессование (статическое и динамическое), напыление, экструзия и др. Однако присутствие высокомодульных и высокопрочных упрочняющих элементов накладывает определенные особенности на поведение КМ в процессе уплотнения, некоторые из которых рассмотрены ниже.

Теоретические основы технологии КМ

Принципиально ясно, какие потенциальные возможности заложены в КМ, однако далеко не во всех случаях так же ясно, как эти возможности реализовать. Сейчас технология получения КМ является лимитирующим участком, от успешного продвижения на котором зависит успех всей программы работ по КМ. Между тем, исследованию технологических процессов изготовления армированных систем уделяется крайне мало внимания.

Публикации об экспериментальных исследованиях процессов формирования структуры КМ занимают около нескольких процентов от общего числа работ по КМ, а теоретические аспекты этой проблемы вообще почти не находят отражения в технической литературе.

Известно, что каждая композиция требует своей, специфической технологии, выбор которой зависит от физической природы компонентов, их совместимости, механических свойств и т.д. Для одних систем предпочтительна пропитка (например, $Cu - W$), для других – использование технологии "сэндвичей" ($Al - B$, Al – сталь), для третьих – классические приемы порошковой металлургии с использованием матрицы в виде порошка и применением технологии спекания, горячего прессования, динамического горячего прессования и др. (например, армированные маг-

Материалы на основе волокон "среднетемпературных" металлов

Если материалы 1-ой группы были практически неизвестны в СССР до разработок ИПМ, то для "среднетемпературных" металлов (никель, 48А, 1Х18Н9Т, 50ХФА, Х20Н80) существовали разработки волокнистых материалов на основе дискретных волокон.

Технология получения их заключается в осаждении из суспензии слоя волокон, промывке полученного сырого войлока, прессовании и спекании.

Успешные разработки материалов с ориентированной структурой (с использованием сеток трикотажного переплетения) на основе волокон тугоплавких металлов позволили надеяться на успешные разработки и материалов на основе "среднетемпературных" металлов.

При разработке методов формирования этих материалов исходили из того, что в данном случае применимы и методы импульсной деформации (динамическое и взрывное прессование) и традиционные методы порошковой металлургии – холодное прессование и спекание, горячее прессование и прокатка.

Оптимальными методами формирования, как с точки зрения технологичности, так и по полученным результатам, являются методы:

1) холодного прессования (или прокатки) с последующим спеканием;

2) динамического теплового прессования (ДТП) + спекание.

Динамическое горячее прессование дает высокие результаты прочности только при получении материалов с высокой относительной плотностью (θ = 0,85–0,9).

Сравнительный анализ прочностных характеристик порошковых материалов, волокнистых материалов на основе дискретных волокон и волокнистых материалов с ориентированной структурой показывает, что преимущество материала с ориентированной структурой несомненно.

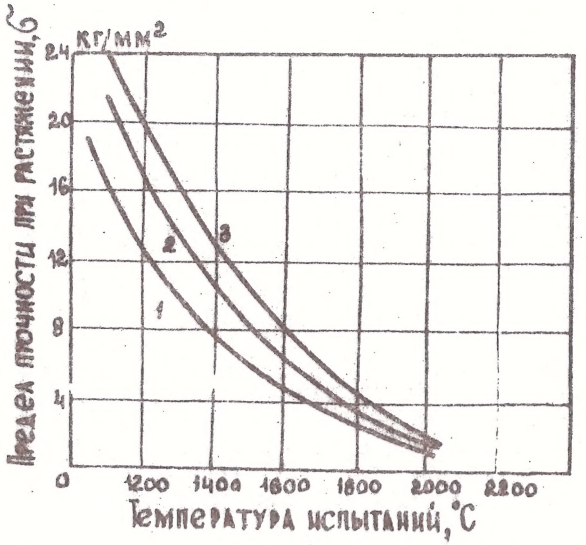

Рис.4. Характеристика кратковременной прочности волокнистого Mo :
1. Рекристализованный Mo .
2. Деформированный Mo .
3. Волокнистый Mo с ориентированной структурой (пористость 15%).

Определенная по значениям ударной вязкости T_x Mo и W значительно ниже T_x порошковых пористых и компактных металлов (для них T_x по этим же измерениям равна, например для W - 450-900°С).

Проведенные испытания на длительную прочность при ограниченной временной базе (до 1000 мин) показали, что длительная прочность W и Mo лежит на уровне и несколько превосходит значения длительной прочности компактных металлов.

нитно-твердые материалы, армированная керамика и т.д.).

Возможности каждого метода применительно к получению КМ не могут быть выяснены до конца без глубокого теоретического анализа процессов, происходящих при их уплотнении.

В нашей лаборатории проведены исследования по разработке теоретических основ уплотнения КМ. Были предложены модели для описания кинетики уплотнения армированных материалов с порошковой матрицей при спекании /5,6/, статическом и динамическом горячем прессовании /7-11/, базирующиеся на теории объемного вязкого течения пористых тел. Проведен также анализ процессов уплотнения КМ типа "сэндвич". На основе этих моделей получены уравнения, описывающие зависимости между температурой, давлением, временем, исходной и текущей пористостью КМ при указанных технологических схемах. Не останавливаясь на выводе полученных зависимостей, отметим наиболее интересные результаты, следующие из них:

1. Уплотнение КМ с порошковой матрицей при спекании осуществляется только за счет уменьшения пористости матрицы. Это позволяет использовать подход, развитый в работах В.В.Скорохода /1/, основанный на представлении спекания как реологического процесса объемного вязкого течения пористых тел. Получены кинетические уравнения спекания однонаправленных и хаотически армированных КМ.

Кинетика спекания однонаправленных КМ может быть описана уравнением:

$$\frac{\theta-\theta_{исх}}{(1-\theta)(1-\theta_{исх})}+\frac{3}{1-V_в}\ln\frac{(1-V_в\theta)(1-\theta_{исх})}{(1-V_в\theta_{исх})(1-\theta)}=4\ln\frac{1-\theta_{исх}}{1-\theta_{исх}\exp(-3\tau)},$$

где θ – текущая пористость,
$\theta_{исх}$ – исходная пористость,
$V_в$ – объемная доля волокон,
τ – приведенное время спекания,

$$\tau=\frac{3}{4}\frac{\gamma_n}{\mu_0}\int_0^t\frac{dt}{\eta_0},$$

где γ – поверхностная энергия матричного материала,

r_0 – средний размер частиц порошка матрицы,

η_0 – коэффициент сдвиговой вязкости матрицы.

Анализ полученного уравнения показывает, что спекание армированных материалов происходит с существенно меньшей скоростью, чем спекание неармированных порошковых объектов.

В отличие от спекания традиционных порошковых объектов, при котором теоретически возможно достижение самой малой пористости, при спекании армированных композиций существует предельно достижимое значение пористости (θ_∞), ниже которого уплотнение матрицы невозможно. Текущая пористость (θ_γ) может быть определена из уравнения спекания путем подстановки в него $\gamma \to \infty$.

Получены также зависимости, устанавливающие связь между пористостью неармированного материала ($\theta_н$) в текущий момент времени и пористостью армированного материала в тот же момент при условии их одинаковой исходной пористости:

$$\frac{\theta-\theta_{исх}}{(1-\theta)(1-\theta_{исх})}+\frac{3}{1-V_в}\ln\frac{(1-V_в\theta)(1-\theta_{исх})}{(1-V_в\theta_{исх})(1-\theta)}=4\ln\frac{1-\theta_{исх}}{1-\theta_н}.$$

Использование этого уравнения позволяет по известным кинетическим кривым спекания обычных (неармированных) материалов прогнозировать закономерности спекания армированных композиций и выбирать режимы спекания без проведения специальных, обычно очень трудоемких и дорогостоящих экспериментов.

Кинетика спекания хаотично армированных материалов с дискретными волокнами может быть описана уравнением:

$$\theta=\theta_{исх}\exp\left[-\frac{9}{4}\frac{\gamma n}{r_0}\frac{3}{3+\frac{V_в}{1-V_в}\left[2\left(\frac{r}{d}+\frac{d}{\ell}\right)+5\right]}\int_0^t\frac{dt}{\eta_0}\right].$$

Из этого уравнения видно, что скорость уплотнения хаотично армированных материалов уменьшается с увели-

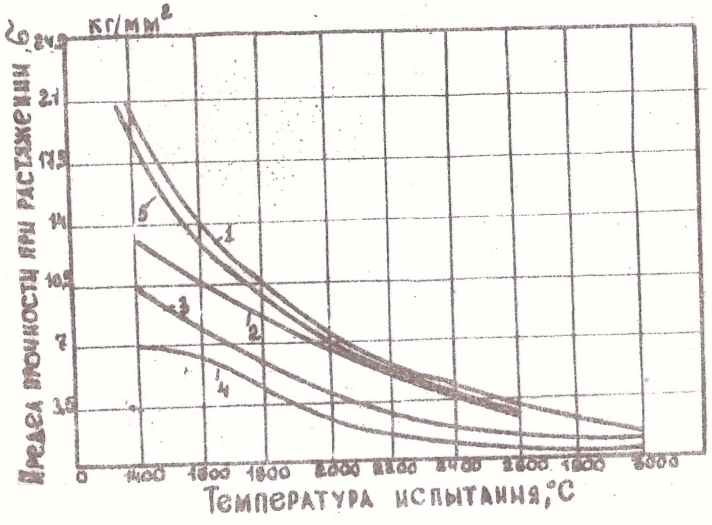

Рис.3. Характеристика кратковременной прочности волокнистого W :
1. Сплав W – 3% Re . 2. Спеченный W .
3. Полученный дуговой плавкой и деформированием.
4. Монокристаллический W .
5. Волокнистый W с ориентированной структурой (пористость – 25%).

Характерно, что проницаемые материалы при пористости до 25% обладают более высокими характеристиками прочности во всем диапазоне температур. Ударная вязкость волокнистого Mo при 20° равна 1,5–2,0 кгм/см^2, что выше характеристики компактного металла.

Несомненным преимуществом разработанных материалов является низкая температура хладноломкости ($T_х$): для волокнистого W $T_х$=150÷250°С, для волокнистого Mo – (–190)÷(–100)°С.

Для создания высокопрочных материалов, обладающих повышенными характеристиками ударной вязкости, были разработаны следующие основные методы:

1. Применение волокон в нагартованном состоянии. При этом волокна вольфрама обладают прочностью до 400 кг/мм^2; волокна молибдена - до 280-300 кг/мм^2.

2. Применение импульсных методов формирования (метод взрывного формирования динамического теплового прессования).

Отличительной особенностью этих методов является то, что процесс формирования осуществляется при температурах, не превышающих температур рекристаллизации. Для тугоплавких металлов (W и Mo) это позволяет избежать катастрофического охрупчивания волокон в процессе формирования материалов.

Кроме основных особенностей создания проницаемых материалов на основе W и Mo , следует отметить, что непрерывные волокна были предварительно объединены в вязаные сетки, обладающие повышенной объемностью, что, кроме процесса схватывания, способствовало механическому "защемлению" слоев между собой.

Были разработаны и установлены основные закономерности процесса взрывного и динамического формирования материалов на основе волокон тугоплавких металлов, определены характеристики энергоемкости и построены диаграммы прессования.

Эти исследования позволили создать материалы, обладающие комплексом уникальных свойств, недостижимых для порошковых материалов: высокой прочностью и жаропрочностью, равномерной и регулируемой проницаемостью при повышенных характеристиках ударной вязкости.

На рис.3 и 4 представлены характеристики кратковременной прочности волокнистых W и Mo при пористости до 25% в диапазоне температур до 2500 и 1750°С соответственно. Там же приведены свойства различных видов соответствующих компактных материалов.

чением $V_в$. Увеличение относительной длины волокон (l/d) приводит к замедлению спекания КМ. Например, скорость уплотнения КМ, содержащих 25 объемн.% хаотично ориентированных волокон с отношением l/d = 100, в 24 раза меньше скорости спекания неармированного материала и в 12 раз - скорости уплотнения КМ, упрочненных равноосными частицами (l/d = 1). Увеличение l/d до 1000 (этот размер характерен для многих нитевидных кристаллов) при прочих равных условиях приводит к уменьшению скорости уплотнения в 224 раза по сравнению со скоростью неармированного материала. Скорость уплотнения стремится к 0 при $l/d \to \infty$, а это означает, что КМ, армированный хаотично, расположенный в пространстве непрерывными волокнами, уплотняться не будет, и стремление системы к уменьшению поверхностной энергии будет сказываться только в росте межчастичных контактов.

При спекании армированных материалов развиваются большие внутренние усадочные напряжения, которые при недостаточной релаксационной способности матричного материала могут приводить к его растрескиванию (это было проверено экспериментально на системах керамических матрица-волокно), поэтому получать композиции на основе хрупких матриц спеканием нецелесообразно.

Спекание может быть рекомендовано как подготовительная операция для получения КМ с пластичной матрицей под последующую пропитку либо обработку давлением.

Была разработана феноменологическая теория уплотнения горячим прессованием КМ с порошковой матрицей, получены кинетические уравнения горячего прессования КМ, составлена программа для расчета режимов горячего прессования и проведена экспериментальная проверка полученных уравнений, показавшая их хорошее согласие с экспериментом. Анализ полученных зависимостей показывает, что нулевая пористость может быть достигнута далеко не во всех случаях. Для каждой геометрии КМ (имеется в виду шаг укладки волокон внутри слоя и расстояние между слоями) существует максимально допусти-

мая исходная пористость ($\theta_{исх}^{max}$), которая может обеспечить получение беспористого состояния при горячем прессовании. Материал с исходной пористостью меньшей $\theta_{исх}^{max}$ всегда будет иметь конечную остаточную пористость.

Горячее прессование порошковых КМ также отличается от горячего прессования обычных порошковых материалов.

Это отличие сказывается в первую очередь в неоднородности усадки по объему. Когда в одних участках матрицы достигнуто беспористое состояние, в других имеется еще довольно большая остаточная пористость. Снижение неоднородности распределения пористости по объему может быть достигнуто за счет уменьшения шага укладки волокон и увеличения толщины матрицы в условиях моносло я, на котором можно разделить КМ, а также уменьшения исходной пористости КМ.

2. Полученные уравнения позволяют по известным сопротивлениям пластической деформации монолитных материалов рассчитать приведенные работы уплотнения КМ при динамическом горячем прессовании (ДГП) и свободной ковке. Интересно, что для получения одинаковой пористости в случае ДГП обычных (неармированных) порошковых материалов энергозатраты на их уплотнение при свободной ковке намного больше энергозатрат при уплотнении в закрытой пресс-форме, тогда как это различие при уплотнении КМ незначительно.

3. Выведенные соотношения позволяют рассчитывать технологические параметры процессов спекания и горячего прессования по известным кривым уплотнения неармированных материалов, что дает возможность резко сократить затраты на проведение экспериментов.

Теоретический анализ уплотнения композиций типа "сэндвич" методами диффузионной сварки и ковки в закрытых штампах позволил установить связь между технологическими факторами (температурой, давлением, временем) и пористостью и выбирать режимы, обеспечивающие достижение

ширенным диапазоном пористости (10–95% по сравнению с 10–60–65% для порошковых материалов), но и с повышенными характеристиками прочности, пластичности и ударной вязкости, что обусловливается вышеуказанным фактором большого количества контактных участков.

Но это, особенно для материалов из волокон тугоплавких металлов, не единственное преимущество волокновых материалов. Особым разделом МВ является интенсивно развивающееся (особенно в США) направление по созданию материалов на основе сеточных полуфабрикатов с ориентированной структурой, применение которых позволяет:

1) упростить методы формирования, создать непрерывный технологический процесс получения материалов с заданной пористостью;

2) создать материалы с повышенными характеристиками прочности и проницаемости по сравнению не только с порошковыми, но и с волокновыми материалами на основе дискретных элементов.

Наша лаборатория проводит с 1964 года разработки пористых проницаемых материалов с ориентированной структурой по двум основным направлениям:

1) создание материалов на основе волокон тугоплавких металлов;

2) создание на основе непрерывных волокон "среднетемпературных" металлов – никеля, углеродистых и малолегированных сталей (У8А, 7О, 5ОХФА), нержавеющей стали 1Х18Н9Т и 1Х18Н1ОТ, нихрома Х2ОН8О.

По назначению эти материалы транспирационного, демпфирующего звукопоглощающего и фильтрующего назначения.

Материалы на основе волокон тугоплавких металлов

Ранее созданные пористые проницаемые материалы из тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена и др.) на основе порошков обладали существенными недостатками: недостаточной прочностью, проницаемостью, высокой хрупкостью.

В связи с полученными результатами следует отметить, что сейчас слишком велико увлечение чисто прочностным аспектом и недостаточно внимания уделяется другим факторам, которые во многих случаях являются не менее важными, чем прочность. Большинство современных материалов не удовлетворяют требованиям конструкторов не из-за низкого предела прочности, а из-за низкой усталостной прочности (это относится, например, к Al - сплавам).

Конструкторы вынуждены предусматривать 4-х-5-ти-кратные запасы прочности, потому что промышленные сплавы обладают недостаточной живучестью из-за того, что процесс распространения трещин в них происходит катастрофически. Армирование позволяет сделать этот процесс управляемым, существенно уменьшить его скорость, и это могут обеспечить не только однонаправленные, но и хаотично армированные материалы, технология получения которых намного более проста, чем технология получения однонаправленных КМ.

Волокновые материалы

В последние годы широкое развитие как в СССР, так и за рубежом (особенно в США) получила новая ветвь порошковой металлургии - металлургия волокна (МВ), или так называемая волокновая металлургия.

Определяющей особенностью МВ является то, что в качестве исходных материалов применяют неравноосные частицы. Отношение длины к диаметру (или сторонам) такой частицы ($\frac{l}{d}$) обычно более 10-100. Использование таких неравноосных частиц определяет основное преимущество материалов, созданных на их основе. Оно заключается в том, что резко возрастает число контактов одной частицы с окружающими. И если при применении сферических порошковых частиц число контактов (теоретически) не может быть более 10, то в случае МВ число контактов на порядок, по крайней мере, больше (100 и более).

Это позволяет получать материалы не только с расположение монолитного состояния.

Один из вопросов, требующих пристального внимания и изучения, - это вопрос о формировании связей между компонентами КМ. Режимы уплотнения должны обеспечивать получение прочных металлических связей матрица-матрица и матрица-волокно.

Проведенные исследования показали, что в КМ типа "сэндвич" для образования связей между матричными слоями при динамическом уплотнении на молоте требуется существенно меньшая степень пластической макродеформации, чем для образования связей в биметалле (при отсутствии волокон). Это связано с процессами микродеформации матричного металла (выдавливанием матрицы в промежутках между волокнами), в результате чего при одинаковой общей макродеформации эффективная деформация матрицы в армированном материале больше, чем в биметалле.

До настоящего времени не выяснены условия, при которых обеспечивается заданный уровень прочности связи между волокнами и матрицей. Регулирование этих связей позволяет в самых широких пределах варьировать свойства КМ. В зависимости от требований, предъявляемых к КМ, в одних случаях достаточны (и даже желательны, если речь идет о повышении сопротивления КМ распространению трещин) фрикционные связи, в других, когда необходимо повысить предел прочности при изгибе, сжатии, сдвиге - требуются металлические связи с максимальной прочностью.

Технологические аспекты материаловедения композиционных материалов требуют всестороннего изучения, нуждаются в глубоком теоретическом анализе. Пока теории уплотнения порошковых КМ уделяется очень мало внимания, и восполнение этого пробела является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед наукой о композиционных материалах.

Свойства металлических КМ

В настоящее время по уровню и масштабам приведенных работ в различных странах можно считать, что

наиболее перспективными конструкционными материалами на металлической основе являются материалы на основе Al , Mg и их сплавов, упрочненные высокопрочными и высокомодульными волокнами бора, карбида кремния и стали.

В таблице приведены основные механические свойства композиций на основе Al и Mg , упрочненных волокнами. Композиции Al – сталь могут найти применение там, где жесткость и дешевизна преобладают над удельной прочностью.

Особенно эффективно армирование при повышенных температурах. Указанные композиции работоспособны при температуре до 623÷673°К и имеют при этих температурах высокие характеристики, тогда как высокопрочные алюминиевые и магниевые сплавы резко разупрочняются.

Прочность композиционного материала обусловлена связью на поверхности раздела волокно–матрица, что хорошо видно на изломе образцов, где четко просматривается явление "вырыва" волокон из матрицы и дефектная структура композиции с неравномерным распределением однонаправленно упрочняющих волокон.

Фрактография излома композиции Al – сталь с однонаправленным армированием после испытаний композиций на растяжение при комнатной температуре свидетельствует, что характер излома при армировании алюминиевой матрицы стальной проволокой – вязкий, волокна при разрушении композиций вытягиваются с образованием шейки. В момент разрушения матрица отрывается от волокна в результате локализации в нем деформации. Однако отрыв не всегда идет по границе раздела волокно–матрица; иногда он проходит по матрице. Это подтверждает сложный характер взаимодействия матрицы с волокном.

Методы порошковой металлургии нашли применение при изготовлении жаропрочных композиционных материалов на основе никеля и кобальта, предназначенных для использования в ответственных узлах энергетических установок. Высокая жаропрочность таких композиций

жает брак при механической обработке постоянных магнитов и повышает надежность работы различных агрегатов, бортовой аппаратуры в условиях вибраций, теплосмен и ударных нагрузок –/12/.

На рис.1 представлена зависимость ударной вязкости хаотически армированного вольфрамом сплава ММК–7 от объемной концентрации волокон. Как видно из графиков, с ростом Vf линейно возрастает удельная работа разрушения. Аналогичный характер носит зависимость ударной вязкости от диаметра волокон, во всем исследованном диапазоне диаметров работа разрушения увеличивается пропорционально диаметру при постоянной V_β и ℓ/d (рис.2).

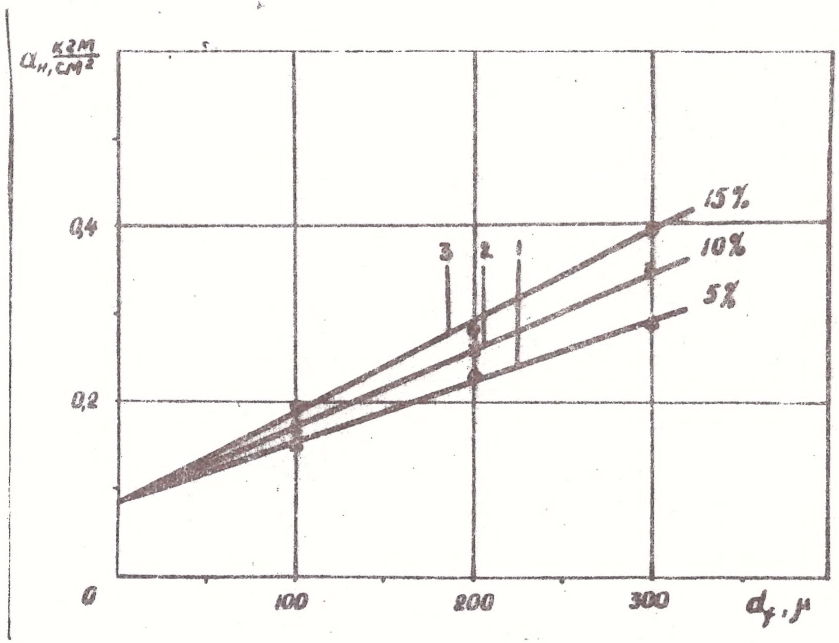

Рис.2. Влияние диаметра на ударную вязкость композиций. Значения Vf : 1–5; 2–10; 3–15 объемн.%.

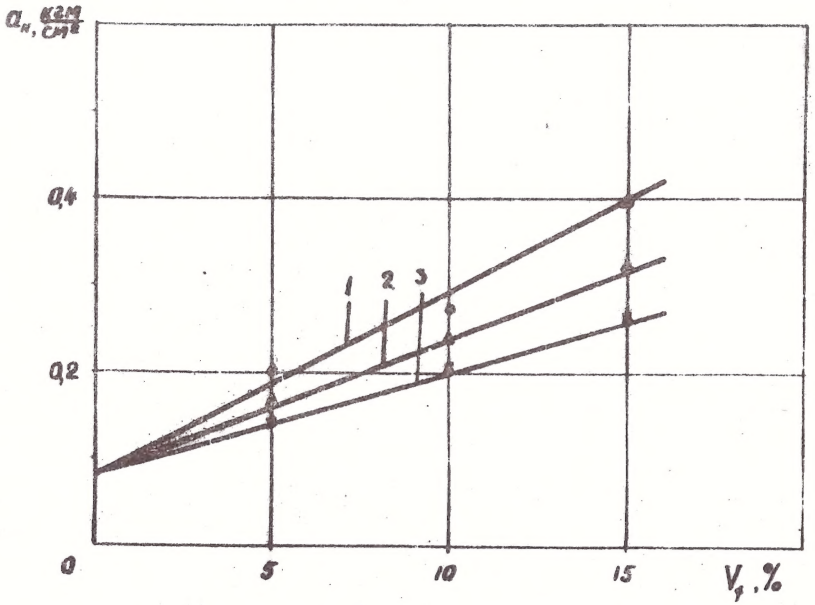

Рис.1. Зависимость ударной вязкости композиций от объемной концентрации волокон.
Значения l/d : 1–20; 2–30, 3–40, d =0,3 мм.

В качестве примера можно привести существенное повышение термической стойкости керамических материалов (Al_2O_3 , Cr_2O_3), армированных усами мулита. Интересные результаты получены при армировании магнитно-твердых сплавов типа ММК и гексаферита бария.

Армирование цветных постоянных магнитов 5÷15 объемн.% металлических волокон, сохраняя величину коэрцитивной силы и очень незначительно (на 5÷15%) снижая остаточную индукцию и максимальную магнитную энергию, в 5–10 раз повышает их ударную вязкость, что резко сни-

Таблица

Физико-механические свойства армированных композиций

Состав композиции	Структура композиции	Средняя прочность, кг/мм²		Модуль Юнга, кг/мм²	Плотность, г/см³	Удельная прочность, км	
		в продольном направлении	в поперечном направлении			в продольном направлении	в поперечном направлении
		20°	400°	20°			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
АМг 3+46 объемн.% волокон Н16К4М5Т	Сонаправл. армирован. ОА	152,3	69,2	11,8	13500	5,04	21,5	2,4
АМг 3+46 объемн.% SiC	ОА	90,0	70,4	12,6	25000	3,25	27,0	3,7
АМг 3+47 объемн.% B	ОА	124,0	82,0	12,5	21500	2,65	46,7	4,6
АМг 6+47 объемн.% B	ОА	136,5	84,5	20,8	21500	2,65	51,3	8,6

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Mg + 48 объемн.%B	ОА	138,5	87,2	14,2	22000	2,02	69,2	7,1
Mg + 46 объемн.% ЭП322	ОА	157	70,4	12,8	12100	4,5	35,5	3,2
Mg + 47 объемн.%SiC	ОА	98	69,8	14,5	25000	2,70	41,2	6,0

достигается применением упрочнителей, не растворяющихся в матрицах при рабочих температурах.

Наиболее эффективно используются композиты с однонаправленной ориентацией упрочняющей фазы в деталях и узлах конструкций, в которых главные усилия распределяются продольно в направлении армирующих волокон, например в рабочих лопатках газотурбинного двигателя. В этом случае возможно максимальное использование прочности арматуры. Значительно выигрывают в прочности по сравнению с наиболее жаропрочными серийными сплавами композиции, в которых матричный сплав ВЖ98 армируют торированной вольфрамовой проволокой марки ВТ15. Такую композицию получали динамическим уплотнением наборов из чередующихся листов металла и слоев однонаправленных армирующих вольфрамовых проволок.

Во всем диапазоне исследованных температур кратковременная прочность такой композиции выше прочности неармированной матрицы, а в области температур 1100-1200°С прочность этих материалов превышает предел прочности современных литых жаропрочных сплавов.

Повышение сопротивления распространению трещин путем армирования

Наряду с повышением механических характеристик металлов, метод армирования позволяет управлять такой важной характеристикой материалов как сопротивление распространению трещин. Это особенно важно для хрупких материалов, таких как керамика, тугоплавкие соединения, магнитно-твердые материалы, одним из наиболее существенных недостатков которых является низкая ударная вязкость, склонность к сколо- и трещинообразованию.

Гетерогенная структура КМ, включающая большое число поверхностей раздела, при правильном выборе размеров и формы армирующей фазы, а также прочности связи между волокнами и матрицей, способна оказывать намного большее тормозящее действие на продвижение трещин, чем гомогенная структура.